

DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DES CHAUSSEES POUR VOIRIES DE METROBUS DANS LA VILLE DE MEXICO

R. MARTINEZ

Ministère des Travaux Publics, Gouvernement de la Ville de Mexico, Mexique

rafael_mcxal@hotmail.com

J.M. BALAY & Y. BROSSEAUD

Ministère des Transports de France, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France

balay@lcpc.fr & brosseau@lcpc.fr

RÉSUMÉ

Le Gouvernement du District Fédéral (GDF) a implémenté dans les années récentes diverses politiques de développement durable pour la construction et entretien de l'infrastructure routière de la Ville de Mexico. L'une des politiques les plus importantes est la construction du réseau de transport nommé MetroBus, qui constitue une alternative efficace pour le transport des passagers à travers de toute la ville.

Conçu comme un réseau de transport de passagers en site propre sur des voiries importantes, le réseau de MetroBus utilise des autobus de caractéristiques spéciales, lesquels dûs à leur circulation canalisée induisent des efforts très élevés dans les infrastructures, et notamment dans la chaussée. De plus, la composition très variable du sol de la Ville de Mexico rend beaucoup plus difficile l'établissement des structures de chaussées standards de portance suffisante.

Le travail conjoint entre le GDF et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a permis l'établissement d'un catalogue de structures de chaussées spécialement adaptées en suivant la méthodologie française de dimensionnement. Les dimensionnements résultants sont adaptés aux sols de la Ville de Mexico et sont fonction de la qualité des matériaux utilisés, prenant en compte leurs performances de laboratoire, mais également les conditions de leur réalisation sur chantier.

Actuellement, les travaux de la collaboration visent la formulation de ces matériaux structurants permettant de satisfaire les performances retenues dans le dimensionnement, et adaptées au contexte de Mexico.

1. LE RÉSEAU DU METROBUS

La Ville de Mexico, avec sa banlieue, est une des zones les plus peuplées du monde avec environ 20 millions d'habitants [1]. Malgré des réseaux importants de transport traversant la ville, qui incluent les 12 lignes de Metro, le système de Trolebus (bus électrique semi-confiné), des bus et des microbus ; le transport public des passagers dans la ville reste l'un des problèmes majeurs. Depuis déjà de nombreuses années, la circulation des véhicules particuliers est devenue extrêmement difficile avec des implications très importantes sur la qualité de l'air et par voie de conséquences sur la santé, la sécurité et le confort des habitants de la ville.

Depuis 2006, la Ville de Mexico a commencé à construire un réseau de transport en commun de passagers en site propre empruntant les voiries principales (grands boulevards urbains). Ce réseau vise à améliorer le transport de surface, par une réorganisation des voiries et la récupération des espaces publiques, en disposant d'un

service de transport plus rapide, plus sûre, et mieux organisé, tout en réduisant, manière considérable, les émissions des gaz à effet de serre [2]. A ce jour, le réseau comporte 3 lignes qui desservent plus de 67 km, avec une capacité de plus de 620 millions de passagers par jour. Il est prévu d'augmenter la capacité de transport, par la construction de 2 nouvelles lignes, en 2011.

Depuis la mise en service de la ligne 1, la circulation canalisée des bus très lourds (près de 40 tonnes de charges roulantes) a entraînée des dégradations rapides et fortes des anciennes chaussées (non conçues pour ces types de transport), y compris dans les couches structurelles, et ce, même sur des sites où le sol support présentait une portance élevée. Pour cette raison, le ministère des travaux publics de la ville de Mexico a rapidement vu la nécessité d'adapter des structures de chaussées spécialement conçues pour supporter les charges spécifiques, induites par la circulation des MetroBus.

La grande variabilité de la nature des sols dans la vallée de Mexico pose le problème du manque d'homogénéité de la portance des plateformes permettant de construire des structures de chaussées durables. En effet, le centre ville de Mexico repose sur une très ancienne lagune (zone compressible), où les conditions de sols très saturés d'eau conduisent à de très faibles résistances mécaniques. Cela impose des traitements préalables des sols avant la construire les couches de fondations des chaussées.

En 2009, le gouvernement de la ville de Mexico (GDF) a signé une convention de partenariat avec le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), du ministère français des transports français, permettant un transfère de technologies pour la conception et dimensionnement des chaussées en suivant les méthodologies françaises. L'une des tâches de cette collaboration porte sur le dimensionnement des structures de chaussées spécialement conçues pour le réseau MetroBus à travers toute la ville et sur tous types de sols supports, représentant des portances très faibles (zone lagunaire) à très résistantes (massifs rocheux).

Dans ce contexte, l'objectif est d'établir un catalogue de structures de chaussées capables de supporter les demandes du réseau du MetroBus pour une durée de vie de 30 ans, adaptables aux conditions spécifiques des sols de la ville, en utilisant des matériaux spécialement formulés pour chacune des couches de chaussée, en suivant des méthodes et des pratiques de construction recommandées par l'expérience française.

2. DÉMARCHE DE DIMENSIONNEMENT PROPOSÉE

Le dimensionnement des structures de chaussées routières et autoroutières du réseau routier national s'effectue en France selon la méthode rationnelle LCPC-SETRA. L'ensemble des hypothèses et des modalités de mise œuvre de la méthode rationnelle est décrit dans le Guide technique conception et dimensionnement des chaussées [3]. La méthode rationnelle s'appuie sur le logiciel Alizé-LCPC, qui en facilite les conditions pratiques de mise en œuvre.

Cette démarche de dimensionnement est aujourd'hui largement diffusée à l'étranger. Sur proposition et sous contrôle du LCPC, la méthode rationnelle a été appliquée au dimensionnement de structures pour systèmes de transport en commun sur pneus ou sur rails à l'occasion de différents projets en France et à l'étranger. Ainsi, pour le dimensionnement de la structure de chaussée du futur Métrobus de la ville de Mexico, cette méthode générale de dimensionnement a été utilisée, moyennant les diverses adaptations décrites dans le présent document.

La méthode de dimensionnement rationnelle prend en compte les facteurs suivants:

- le trafic,
- l'environnement (données climatiques),
- la plate-forme support de chaussée,
- les matériaux de chaussée,
- la qualité de la réalisation de la chaussée,
- l'exigence de niveau de service fixée par la maîtrise d'ouvrage, qui est directement traduite dans le dimensionnement par une valeur de risque de rupture à l'issue de la durée de service de la chaussée.

2.1. Le trafic

Les chaussées sont dimensionnées vis-à-vis du trafic poids lourds et des véhicules lourds (par exemple bus, hyperbus, tramways en milieu urbain). Dans les applications routières et autoroutières, il est exprimé en termes de trafic poids lourd cumulé sur toute la durée de service de la chaussée (TC). TC est calculé par la formule suivante:

$$TC = 365MJA \left(d + \frac{td(d-1)}{2} \right)$$

MJA: nombre journalier de poids lourds par sens de circulation sur la voie la plus chargée à la mise en service (moyenne journalière annuelle),
t: taux annuel de croissance linéaire du trafic,
d: durée de vie, en années.

Ce trafic poids lourds est constitué de combinaisons variables de véhicules ayant des charges à l'essieu et des configurations d'essieux différentes. La méthode de calcul implique la conversion de ce trafic composite TC, en un nombre cumulé d'essieux de référence, NE, équivalent au trafic cumulé TC en terme d'endommagement de la chaussée. En France, l'essieu conventionnel de référence est l'essieu isolé à roues jumelées de poids total 130 kN (32.5 kN par roue). Le coefficient d'agressivité moyenne du trafic (CAM) permet d'effectuer cette conversion:

$$NE = TC \cdot CAM$$

L'agressivité CAM des essieux est déterminée de façon théorique. Le calcul nécessite la connaissance statistique des différentes configurations d'essieux, et des charges associées, constituant un trafic lourd donné. Ces données sont généralement fournies par les systèmes d'analyse du trafic lourd (comptage et pesage) équipant les différents réseaux routiers. Pour chaque type d'essieu (simple, tandem et tridem), ces données sont traduites en histogrammes pourcentage d'essieux versus charges sur essieux.

Sur le réseau national, les études d'analyse du trafic lourd sont mises à jour périodiquement, et les coefficients CAM correspondent à des valeurs moyennes nationales. L'agressivité ne s'exprime pas par une relation unique. En effet les valeurs de CAM dépendent, outre la composition trafic, du matériau et de la structure de chaussée (souple, bitumineuse épaisse (cas du présent article), semi-rigide (grave traitée aux liants hydrauliques), rigide (béton de ciment)).

2.2. L'environnement - les données climatiques

La température influence le comportement des différents types de chaussées:

- par son influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux, en raison de leur comportement thermo-visco-élastique,
- par les variations d'ouverture des fissures dans les matériaux traités aux liants hydrauliques ou bétons de ciment, qui accompagnent les variations cycliques de température,
- par les déformations de cambrure des dalles dues aux gradients thermiques dans les chaussées rigides.

Pour les matériaux bitumineux, les calculs sont faits en considérant une température du matériau de chaussée constante, appelée température équivalente. En France métropolitaine, la température équivalente utilisée pour les dimensionnements courants est de 15°C, valeur résultant d'histogrammes types de distributions annuelles des températures dans les chaussées bitumineuses. Pour le dimensionnement outre-mer ou dans des pays étrangers, une valeur différente sera a priori utilisée, en fonction du climat considéré. Dans la présente étude du Métrobus de Mexico, la valeur de température équivalente adoptée sera de 20°C.

La structure de chaussée qui résulte du dimensionnement mécanique fait également l'objet de vérification au gel-dégel. En présence de sols sensibles au gel, cette vérification vise à s'assurer que le maintien du trafic poids lourd pendant les périodes de dégel ne se traduira pas par une dégradation accélérée de la chaussée. Cette vérification au gel-dégel est sans objet dans le cas de la présente étude pour le Métrobus de Mexico.

2.3. La plate-forme support

Le Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme [4] caractérise les sols supports, le choix des matériaux utilisables pour la couche de forme et leurs conditions de mise en œuvre. Pour le dimensionnement de la structure de chaussée, le sol support est décrit par une valeur de module d'Young et du coefficient de Poisson. L'approche rationnelle se différencie donc nettement des méthodes empiriques telles que la méthode AASHTO, pour lesquelles la portance du massif support est représentée par l'indice CBR du sol.

2.4. Les matériaux de chaussée

Un ensemble de normes codifie les différentes familles de matériaux de chaussée, définissant pour chacune d'elles des classes de performances selon la qualité des constituants et certaines propriétés physiques et mécaniques des mélanges. Pour les matériaux normalisés, les valeurs de résistance mécanique et de déformabilité retenues sont déduites des valeurs moyennes obtenues sur la formule de base, établie lors de l'étude de formulation réalisée en laboratoire avec les constituants du chantier. Le niveau de l'étude de formulation, adaptée au contexte du chantier, permet d'évaluer l'aptitude au compactage (essai de presse à cisaillement giratoire), la vérification de la résistance à l'eau (essai Duriez) et à l'orniérage (essai ornièreur LPC), tout en déterminant les propriétés mécaniques retenues pour le dimensionnement, comme le module (fonction de la température et la fréquence choisies) et la résistance en fatigue. La détermination des sollicitations admissibles vis à vis de la fatigue par les matériaux prend en compte la dispersion qui caractérise les résultats des essais de fatigue en laboratoire.

2.5. La qualité de la réalisation des travaux de construction

La méthode de dimensionnement s'applique à des situations pour lesquelles les prescriptions et les règles de l'art concernant la fabrication et la mise en œuvre des matériaux sont totalement respectées. Cependant, elle permet d'intégrer des écarts entre les épaisseurs nominales des couches de matériaux et les épaisseurs réellement mises en œuvre. Ceci s'effectue à partir d'hypothèses sur les dispersions d'épaisseur, issues des observations sur chaussées. Les performances en fatigue des matériaux traités sont également caractérisées par leur dispersion statistique (voir plus bas, paramètre SN).

2.6. Calcul mécanique des sollicitations créées par le trafic

Nous considéreront tout particulièrement dans ce paragraphe, les matériaux de chaussées envisagés pour la réalisation de la structure de chaussée du Métrobus de Mexico, à savoir les matériaux hydrocarbonés les plus performants sur le plan mécanique, à l'exclusion des matériaux traités aux liants hydrauliques et des bétons de ciment.

Le dimensionnement consistera à déterminer:

- d'une part, les sollicitations créées par le trafic dans les différentes couches de matériaux. Cette évaluation repose sur un modèle théorique dans lequel la chaussée est assimilée à un massif multi-couche, semi-infini, en adoptant pour les matériaux un comportement linéaire-élastique et isotrope.
- d'autre part, les sollicitations admissibles par les matériaux constituant la chaussée, vis à vis de l'endommagement par fatigue.

2.6.1. Les matériaux bitumineux

Ces matériaux sont définis dans les normes françaises issues de la normalisation européenne, et réparties en 3 catégories:

- essais de caractérisation des performances en laboratoire NF EN 12697 -1 à -43 [5],
- classification des enrobés selon leurs performances et usages, ainsi que sur leur condition de fabrication et de contrôle NF EN 13108-6 à -21 [6],
- conditions de mise en œuvre et de réception NF P 98-150-1 [7].

Vis-à-vis du dimensionnement des chaussées, la caractérisation mécanique porte sur:

- la susceptibilité du module d'Young vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement. Cette susceptibilité est évaluée par les essais de module et de perte de linéarité ou de flexion dynamique;
- le comportement en fatigue.

Le comportement en fatigue est apprécié par l'essai de fatigue en flexion pratiqué à la température de 10°C et la fréquence de 25 Hz. La courbe de fatigue du matériau exprime la relation entre la déformation de traction par flexion ε supportée par l'échantillon, et le nombre de chargements N , pour lequel sa rupture par fatigue est observée, selon le critère conventionnel de rupture à 50% de réduction de la rigidité de l'éprouvette. Cette courbe de fatigue est représentée par une relation de la forme ci-dessous, correspondant à une droite dans le repère bi-logarithmique (modèle de fatigue de Wöhler):

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_6} = \left(\frac{N}{10^6} \right)^b$$

avec:

b: pente de la droite de fatigue,

ε_6 : déformation de traction par flexion pour laquelle la rupture est obtenue sous 1 million d'applications du chargement, dans les conditions 10°C, 25Hz.

Les résultats des essais de fatigue se caractérisent par la forte dispersion des résultats, qui est décrite par l'écart type δN sur le logarithme de N.

Pour le dimensionnement, la détermination des sollicitations admissibles par les matériaux découle directement de la courbe de fatigue obtenue en laboratoire, pondérée par divers coefficients permettant de prendre en compte les facteurs tels que la température de la chaussée en service, le risque de rupture admis à l'issue de la durée de service, etc.

L'expression des déformations admissibles est la suivante:

$$\varepsilon_{\text{ad}} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_\theta k_c k_r k_s$$

où k_θ , k_c , k_r et k_s sont des coefficients pondérateurs qui seront explicités plus bas dans ce document.

3. ADAPTATIONS AU DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES GUIDES OU CANALISES SUR PNEUS

La démarche du dimensionnement rationnelle appliquée au cas des plateformes pour systèmes de transport guidés ou ultra-canalises sur pneus nécessitent diverses adaptations, qui seront simplement listées dans cette partie. Elles concernent le calcul de structure, les performances des matériaux et les données de trafic.

3.1. Performances des matériaux

Le dimensionnement des structures des chaussées urbaines [8] prévoit deux niveaux de qualité des matériaux pour assises.

La classe de qualité Q1 correspond à des matériaux dont les performances mécaniques minimales sont celles spécifiées par les normes.

La classe de performances réduites Q2 permet de tenir compte des conditions particulières de réalisation de chantier en milieu urbain (présence d'obstacles divers en profondeur (réseaux, canalisations), en tracé, en intersection (avec la voirie existante), phasage des travaux, partage de l'espace,...).

- Les performances seront alors diminuées de:
 - 20% pour les modules des matériaux hydrocarbonés,
 - 10% pour les déformations admissibles en fatigue.

Par ailleurs, pour les matériaux bitumineux, les valeurs des modules d'Young tiendront compte de la vitesse de circulation en milieu urbain, réduite par rapport aux vitesses sur routes ou autoroutes. Ceci sera réalisé en adoptant pour le choix des modules, une fréquence plus faible que celle de 10 Hz qui est utilisée pour les dimensionnements courants. Compte tenu de l'expérience acquise, sur des études de calcul d'ouvrage de

nature comparable, la valeur 5 Hz sera retenue pour la présente étude. Elle correspond à des vitesses de circulation des véhicules comprises environ entre 20 et 40 km/h.

3.2. Trafic

3.2.1. Calcul de l'agressivité d'un véhicule de transport urbain.

Connaissant l'histogramme de charges par type d'essieu pour un trafic donné, son agressivité est donnée par le coefficient CAM:

$$CAM = \frac{1}{NPL} \left[\sum_i \sum_j K_j n_{ij} \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

avec:

NPL: nombre configurations de chargement considérées.

K: coefficient caractéristique du type d'essieu (simple, tandem, tridem, .)

nij: nombre d'essieux élémentaires de type j et de classe de charge Pi.

3.2.2. Absence de balayage ou canalisation totale

L'une des caractéristiques de la circulation des systèmes de transport urbain est la canalisation quasi-totale de la circulation, se traduisant par une majoration de son agressivité. Cet effet sera pris en compte par un coefficient d'agressivité additionnelle.

Toujours selon les recherches menées (manège de fatigue des chaussées de Nantes) et de l'expérience acquise, son calcul repose sur le calcul, à l'aide du modèle mécanique, du profil en travers des sollicitations supportées par le matériau, et sur la donnée de l'histogramme de balayage latéral standard du trafic. Le calcul du coefficient d'agressivité additionnelle CAc s'effectue en appliquant le principe d'additivité des dommages (principe de Miner), son expression est la suivante:

$$CA_c = \sum_i p_i \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

avec:

i: indice d'une série finie décrivant l'excentrement latéral de la charge par rapport à l'axe longitudinal moyen de circulation,

σi: sollicitation dans le matériau, correspondant à l'excentrement d'indice i de la charge,

pi: pourcentage du trafic appliqué avec l'excentrement d'indice i.

3.2.3. Prise en compte des croisements avec la voirie urbaine

Le dimensionnement de la structure de chaussée dans les zones de carrefour devra tenir compte du trafic routier traversant, dont les effets s'additionnent à ceux des véhicules de transport urbain. Deux situations de dimensionnement doivent donc être examinées:

- sections courantes en alignement droit ou en courbe, et zones de station ;
- zones de carrefour, en prenant les effets cumulés de la circulation Métrobus, et d'une circulation transversale par un trafic routier donné.

Dans les parties en courbe de la voie ou dans les zones d'accélération ou de freinage, la chaussée supporte des sollicitations de nature tangentielle, additionnelles à celles supportées en situation courante (alignement droit et vitesse constante). Comme cela est le cas pour le dimensionnement des structures routières, et notamment des chaussées urbaines, nous considérerons que les effets de ces efforts additionnels se limitent à la couche superficielle de roulement, et qu'ils sont sans influence sur le dimensionnement structurel de la chaussée (couche de base et couche de fondation), en raison de la forte diffusion des contraintes tangentielles dans l'épaisseur de la structure. Dans ces zones particulières, une attention particulière devra donc porter sur le choix de la couche de roulement pour les structures bitumineuses (principalement vis à vis des risques d'arrachement et d'orniérage).

4. DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE EN MATERIAUX BITUMINEUX

Les caractéristiques du Métrobus (charges sur essieux élevées), le trafic intense et son extrême canalisation en site propre nécessitent de la part des matériaux bitumineux un très haut niveau de performance vis-à-vis de l'orniérage et vis-à-vis de l'endommagement par fatigue.

Pour répondre à cet objectif, l'emploi de matériaux bitumineux performants, répondant à la norme NF EN 13108-1 [6] est envisagé:

- en assise de chaussée:
 - grave- bitume de classe 4 (GB4): cette solution ne sera pas étudiée dans le présent travail.
 - ou enrobé à module élevé de classe 2 (EME2). Ce matériau est, grâce à l'utilisation de liant dur, le matériau bitumineux le plus performant, autorisant des dimensionnements de chaussées légèrement réduits par rapport aux graves bitumes, et présentant une très bonne résistance à l'orniérage et meilleure que celle de la GB4.
- en couche de roulement:
 - en section courante: béton bitumineux semi-grenu de classe 3 (BBSG), ou béton bitumineux à module élevé (BBME). Seule la solution BBME sera étudiée ici, car plus efficace en terme de réduction des contraintes mécaniques.
 - au droit des stations et dans les zones critiques (rampes, décélération et accélération, courbe à faible rayon) présentant des risques élevés d'orniérage: l'utilisation d'enrobés drainants percolés au coulis de ciment de 4 cm d'épaisseur (produit non normalisé) est une solution à examiner. De plus, cet enrobé percolé permettrait de bien différencier visuellement les zones de station, avec une sécurité accrue.

L'enrobé à module élevé de classe 2 (EME2) est composé à partir d'un bitume dur (classes 10/20, 15/25 voire 20/30) ou par l'emploi d'additifs (de nature à durcir le bitume), et d'un squelette granulaire particulièrement résistant et structuré pour assurer une très bonne résistance aux déformations. La dimension granulaire maximale est souvent de 14 mm, pour conférer une excellente homogénéité au mélange, permettant un très bon compactage, uniforme sur toute la gamme d'épaisseur retenue: 7 à 12 cm. Pour compenser le caractère fragile du liant, l'épaisseur de film de liant est augmentée, voisine de celle adoptée pour les enrobés de surface (dosage moyen proche de 6%). Cela confère au mélange une très bonne compactibilité, un bon remplissage des vides,

conduisant à un très bon comportement en fatigue. Cet enrobé EME2 est le matériau bitumineux le plus performant sur le plan du des dimensionnements de chaussées à fort trafic, canalisé, et agressif. De plus, il présente une très bonne résistance à l'orniérage, la plus élevée des matériaux bitumineux structurants.

On rappellera que l'origine de ce matériau remonte aux année 1985, où il fut mis au point pour réaliser des travaux de renforcement des chaussées à trafic lourd et canalisé en milieu difficile: milieu urbain. Un guide spécifique décrit les propriétés et usages de ce matériau [9]. Depuis, ce matériau a fait ses preuves et il est largement utilisé. On estime qu'il se réalise environ 5 millions de m² d'enrobés EME2, chaque année en France. Son usage s'est diversifié, avec des applications nombreuses en construction neuve de chaussées autoroutières, ou de routes nationales importantes, mais également en piste aéronautiques supportant des charges extrêmement lourdes (Air Bus A380), sur des zones de quais industriels supportant de charges très lourdes (porte conteneurs) et bien évidemment sur des transports en commun par bus spéciaux, en site propre, comme en région parisienne ou à Nantes pour la ligne de Bus Way.

Les bilans de comportement sont particulièrement satisfaisants. Il n'est pas constaté de défauts consécutifs à l'usage des liants durs, comme de la fissuration retrait, car la formulation, mais aussi les conditions très soignées de leur réalisation et l'application de couches de surface bien adaptées, ont permis de compenser cette pseudo-rigidité. La recherche d'une couche performante et surtout très homogène a permis de développer cette technique, par d'une part la diminution des épaisseurs de matériau (compétitif sur le plan de la conservation des ressources de matériaux non renouvelable), et d'autre part l'augmentation de la durée de service des chaussées soumises à de très fortes contraintes mécaniques.

L'expérience française acquise au cours de ce dernier quart de siècle sur cette technique s'est largement exportée à l'étranger, par des transfères de technologie, nécessitant l'adaptation de ces produits aux contextes différents en terme de climat, charge et matériaux disponibles. Les exemples d'application sont nombreux depuis environ une petite dizaine d'années en Europe (Belgique, Royaume Uni, Suisse, Espagne, Italie, Pologne, République Tchèque,...) et plus récemment en Afrique du Nord, mais également en Chine, au Brésil. Les résultats sont également très encourageants.

Le béton bitumineux à module élevé (BBME) sera de classe 3 afin de présenter les meilleures performances à l'orniérage: son épaisseur d'application optimale est de 5 à 7 m par couche, pour bien résister aux efforts tangentiels de cisaillement au niveau de l'interface. La rugosité de cet enrobé est plutôt fermée, ce qui permet un bon transfert de ces sollicitations, en réduisant le risque d'arrachement. Toutefois, elle reste suffisamment importante (Sand patch test voisin de 0,5 mm) pour offrir un niveau d'adhérence satisfaisant pour de bonnes conditions de freinage par temps de pluie.

Enfin, on observera que le dimensionnement des couches d'assises bitumineuses ne distingue pas les sections courantes en alignement droit, des sections en courbe, ni des zones de station. En effet le dimensionnement considère que les effets des efforts additionnels de cisaillement liés aux courbes et au freinage se limitent à la couche superficielle de roulement. Ils sont sans influence sur le fonctionnement structurel de la chaussée (couche de base et couche de fondation), en raison de la diffusion des contraintes tangentielles dans l'épaisseur de la structure.

4.1. Choix de la couche de surface

4.1.1. *Matériaux proposés en section courante*

La couche de surface comprend:

- La couche de roulement, couche supérieure de la chaussée sur laquelle s'appliquent directement les effets de pneumatiques, et aussi les agressions du climat ;
- Le cas échéant, la couche de liaison qui assure la jonction entre les couches d'assises et la couche de roulement.

La canalisation totale des véhicules Métrobus nécessite a priori de la part des matériaux bitumineux, de très bonnes performances vis-à-vis de l'orniérage. Il n'existe pas à ce jour de modèle prédictif du comportement à l'orniérage des matériaux bitumineux (alors que ces modèles existent pour prédire l'endommagement par fatigue des matériaux de chaussées).

Dans l'établissement des projets routiers et autoroutiers, la justification vis à vis de l'orniérage des matériaux bitumineux est réalisée principalement sur des bases empiriques, en référence souvent avec les résultats sur chaussées en service, obtenus dans un contexte similaire ou voisin de celui du projet étudié. Pour les tramways sur pneus, systèmes de transport en commun très récents, nous ne disposons bien entendu pas de ces retours d'expérience. Les quelques données disponibles aujourd'hui en France (Caen, Nancy) invitent cependant à une grande prudence.

La couche de surface n'intervient que par son épaisseur totale dans le dimensionnement de la chaussée. Le choix du type de revêtement résulte en général d'un compromis entre les deux objectifs suivants:

- la résistance à l'orniérage. Sur ce plan le BBSG (béton bitumineux semi-grenu) et le BBME (béton bitumineux à module élevé) sont les plus performants dans la gamme des bétons bitumineux normalisés. Leur résistance à l'orniérage est équivalente. Vis-à-vis du seul comportement à l'orniérage, la réalisation d'une couche unique de BBSG d'épaisseur 5 cm, granularité 0/10 mm, pourrait être recommandée dans le cas présent. Cette solution ne conviendrait toutefois pas aux zones sensibles telles que stations, virages serrés, carrefours et autres zones de ralentissement.
- les qualités d'uni et de nivellement. Elles ne peuvent être optimisées qu'en prévoyant la mise en œuvre des enrobés de surface en deux couches (couche de roulement et couche de liaison). Le seul critère d'uni et de nivellement conduirait à recommander dans le cas présent la mise en œuvre de béton bitumineux mince (BBM) sur 2 couches de 4 cm chacune, granularité 0/10. Toutefois, ce type d'enrobé mince ne présente pas la garantie optimale de résistance à l'orniérage, même en utilisant des liants spéciaux, aussi le choix s'oriente vers un BBM mieux adapté au trafic canalisé.

4.1.2. *Couche de surface en station et zones critiques*

Les solutions envisagées ci-dessus pour la couche de surface ne règlent pas a priori les risques d'orniérage auxquelles sont particulièrement exposées les zones sensibles telles que les stations, les courbes serrées, les carrefours et autres zones de ralentissement. Dans ces zones où le revêtement est l'objet de fortes sollicitations de cisaillement longitudinal ou transversal, la mise en œuvre d'une couche de roulement en enrobés bitumineux drainants percolés au coulis de ciment est une solution intéressante. Elle a

notamment fait ses preuves dans les applications urbaines, par exemple à Paris pour le revêtement de stations de bus et à Nantes sur les voies du Busway.

Toutefois, leur emploi généralisé à l'ensemble d'un projet ne nous semble pas réaliste, en raison d'un coût élevé, de délais d'exécution plus contraignants que ceux des enrobés classiques, enfin des sujétions de mise en œuvre: travaux par beau temps et soins particuliers à apporter à la réalisation. Enfin on limitera la mise en œuvre des enrobés percolés à des longueurs relativement faibles (de l'ordre de la cinquantaine de mètres), afin d'éviter les risque de fissuration transversale par retrait du matériau.

Pour le choix des matériaux utilisés en couche de roulement et en couche de liaison sur les sections courantes hors zones sensibles, la valeur de 5% pourrait être retenue comme profondeur maximale d'ornièrre mesurée en laboratoire à l'aide de l'ornièrreur LPC (sous 30 0000 chargements, température 60°C). A ceci correspond la classe 3 de matériaux au sens de la norme.

Les propositions de matériaux de couche de roulement ci-dessus seront retenues pour les calculs de dimensionnement. Au niveau de la mise au point finale d'un projet, des produits bitumineux anti-orniérants présentant des performances à l'orniérage supérieures à celles des bétons bitumineux normalisés pourront également être envisagés. Il s'agira généralement de propositions d'entreprises, validées sur la base d'avis techniques et de performances à l'orniérage évaluées par des essais sélectifs.

La norme européenne NF EN 12697-22, pour la détermination de la résistance aux déformations permanentes [10], regroupant 3 matériels d'essai de type ornièrreur, recommande l'usage du matériel grand modèle (ornièrreur LPC) pour les enrobés devant résister à des charges lourdes (essieu supportant une charge supérieur ou égal à 13 tonnes). On recommande donc le choix de ce matériel pour valider les matériaux appliqués sur les zones sensibles (stations, courbes serrées, carrefours, ...), mais également pour les zones courantes.

4.2. Caractéristiques mécaniques des matériaux pour assises

Les valeurs des paramètres Températures équivalente, la fréquence de sollicitation et le choix des hypothèses Q1 ou Q2 qui précèdent conduisent aux paramètres E et ϵ_6 ci-dessous:

Table 1 - Valeurs des paramètres de calcul des matériaux BBME et EME2

Qualité de réalisation	Module E 20°C-5Hz (Mpa)	ϵ_6 10°C-25Hz (μ déf.)	-1/b	SN	Sh (m)	Kc
Q1	4800	/	/	/	/	/
Q2	3840	/	/	/	/	/
Q1	8800	130	5	0.25	0.025	1
Q2	7040	117	5	0.25	0.025	1

4.3. Sols supports

En l'absence de données précises sur la nature et les caractéristiques hydriques et mécaniques des sols supports rencontrés sur les futures lignes du Métrobus, les hypothèses suivantes ont été adoptées pour la présente étude:

- 3 niveaux de portance seront examinés:

- Niveau PF2 (50 MPa au minimum).
- Niveau PF3 (120 MPa au minimum).
- Niveau PF4 (200 MPa au minimum).
- En carrefour avec une voirie urbaine moyennement ou fortement chargée, une plateforme de niveau minimal PF3 sera exigée.
- Les données disponibles ne nous permettent pas de définir les solutions de traitement des sols en place et de couches de forme traitées ou non traitées à réaliser, afin d'atteindre les niveaux de portances retenus ci-dessus.

4.4. Agressivité du Métrobus

Comme indiqué avant, la correction par rapport au trafic routier classique porte sur la prise en compte de:

- l'histogramme des charges à l'essieu fourni par le cahier des charges,
- la canalisation totale de la circulation,
- l'effet de superposition des sollicitations dans les matériaux aux croisements des rames, en raison du rapprochement des voies.

4.4.1. Prise en compte de l'histogramme des charges à l'essieu

La détermination de l'agressivité d'un trafic donné prend normalement en compte:

- les silhouettes et les configurations d'essieux des véhicules composant ce trafic: essieux simple, à roues simples ou jumelées,
- et également les histogrammes de chargement pour chaque type d'essieux du trafic. Dans le cas des systèmes de transport en commun, ces histogrammes sont directement déduits dans caractéristiques des véhicules utilisés, et des statistiques d'utilisation du système de transport par les usagers. Par exemple, 2% des rames chargées à 1 personnes/m², 8% à 2 personnes/m², 18% à 2 personnes/m², etc.

Un seul type de véhicule Métrobus est considéré dans la présente étude: Autobus biarticulé Volvo 7300 BRT. En l'absence de données concernant les fréquences et les histogrammes d'utilisation du système par les usagers, l'agressivité a été calculée en considérant exclusivement les charges maximales sur essieux, fournies par le constructeur:

- Véhicule à 4 essieux simples équipés de roues simples et jumelées.
- Pression de gonflage: 0.689 MPa. La pression de contact pneu-chaussée a été fixée à 0.62 MPa pour tous les essieux, en l'absence de données plus précises.
- Charges maximale par essieu:
 - essieu n°1 à roues simples: 7.5 tonnes soit 3.75 t/roue
 - essieux n°2 à roues jumelées: 12 tonnes soit 3 t/roue
 - essieux n°3 et 4 à roues jumelées: 10.5 tonnes soit 2.625 t/roue

A défaut d'histogrammes précis de chargement, la prise en compte des charges maximales se traduit très probablement par une surévaluation de l'agressivité réelle du trafic, pouvant entraîner in fine un surdimensionnement des structures de chaussée.

- CA1: coefficient d'agressivité moyenne des véhicules, évaluée par rapport à l'essieu de référence du dimensionnement standard français (essieu simple à roues jumelées de poids total 130 kN),

4.4.2. *Prise en compte de canalisation totale de la circulation*

Nous avons considéré, pour caractériser le balayage latéral du trafic routier courant l'histogramme des excentrements adopté en général, notamment pour la reproduction du balayage sur le manège de fatigue du LCPC. Les déformations de traction-flexion créées dans la couche d'EME2 dans l'axe central de la bande de roulement (excentrement nul) par la charge de référence de 130 kN sont calculées par Alizé. Le coefficient additionnel Cac traduisant la canalisation du trafic tramways s'obtient selon la démarche décrite précédemment.

4.4.3. *Prise en compte des effets de croisement*

La distance minimale entre les axes de circulation des roues de deux rames au moment des croisements est égale 0.95 mètre (valeur à confirmer en site réel). La majoration de l'agressivité des rames qui en résulte (coefficient Crt), pour la roue chargée à 58.86 kN (=6 tonnes, cf. essieu n°2), en adoptant l'hypothèse complémentaire suivante: la situation de croisement s'applique à 10% du trafic (valeurs utilisées pour les dimensionnements des voies de Tramway sur pneus de la RATP - Transports Parisiens).

4.4.4. *Evaluation des effets de bord*

En raison de la canalisation totale du trafic en site propre et du confinement spécifique au milieu urbain, une réduction de la largeur de la structure est peut-être envisagée. Cette situation conduit à une augmentation de l'agressivité du trafic. En effet la circulation des véhicules à proximité immédiate des bords longitudinaux de la chaussée induit alors une augmentation des sollicitations de traction-flexion dans les matériaux. En l'absence de données concernant la coupe en travers de la future chaussée, ce coefficient Clg n'est pas pris en compte.

4.4.5. *Trafic Métrobus pour le dimensionnement*

Le trafic Métrobus pour le dimensionnement de la chaussée est fixé par le GDF de Mexico. Il est évalué à 1752 véhicules par semaine sur 2 voies, soit 876 véhicules par semaine sur chaque voie, et finalement:

Trafic moyen journalier annuel: MJA= 126 véhicule par jour/par sens

La durée de service de la chaussée, également spécifiée par le GDF, est de 30 années. Le taux d'accroissement annuel du trafic sur toute cette durée de service est fixé à 5% (accroissement linéaire). Le trafic cumulé pour le dimensionnement s'élève ainsi à: NPL = 2.38 millions de véhicules Métrobus

Par ailleurs, nous rappelons que le dimensionnement a été effectué en supposant que tous les véhicules Métrobus sont chargés à leur poids maximum (nombre maximum de passagers à chaque passage), soit 40.5 tonnes. A titre de comparaison, le poids total roulant en charge du Bus Way de Nantes est seulement de 29 tonnes.

4.5. Résultats des dimensionnements

Pour l'ensemble des structures obtenues, le critère dimensionnant est la déformation de traction par flexion en fond de couche de base en EME2 des structures bitumineuses. Le critère concernant la déformation verticale au sommet du sol n'est jamais atteint, ce qui découle directement de la rigidité des couches d'assise.

Ainsi que cela est toujours l'usage en pratique, les valeurs des épaisseurs proposées pour le matériau EME2 sont arrondies au cm supérieur.

Finalement, les résultats des modélisations ont permis d'établir un catalogue de structures bitumineuses très complet, adaptables aux différentes situations. Ce catalogue prend en compte l'utilisation des structures standards (couche structurale plus couche de roulement) sur des sols dont la portance varie de 50 MPa (PF2), valeur faible pour une plateforme de chaussée à fort trafic où un traitement du sol serait à prévoir, jusqu'à 200 MPa (PF4). Les épaisseurs des couches de base construites avec des EME2 (de performances conformes aux spécifications des normes françaises) varient de 16 cm à 23 cm pour une qualité de réalisation Q1 ou varient de 21 cm à 29 cm pour une qualité de réalisation Q2.

La couche de roulement est toujours en BBME de 7 cm mais il est possible d'utiliser des BBSG.

CONCLUSIONS

Sur la base des caractéristiques de charges sur essieux du Métrobus déterminées par le GDF de Mexico, plusieurs configurations de structures bitumineuses ont été dimensionnées. La durée de vie des structures prise en compte dans les dimensionnements est de 30 ans.

Ces types de structures sont usuels et éprouvés en France, notamment dans des contextes d'utilisation identiques ou très voisins de celui du Métrobus de Mexico.

Les dimensionnements ont été réalisés en considérant des hypothèses variables concernant la portance de la plateforme support: 50 MPa (portance faible, à éviter si cela est possible), 120 et 200 MPa (très bonne plateforme) et la qualité des matériaux (Q1 ou Q2).

Les dimensionnements décrits ci-dessus sont probablement sécuritaires. Ils pourront être l'objet d'optimisation moyennant de la part du GDF de la Ville de Mexico des données complémentaires concernant:

- les caractéristiques du matériel roulant,
- les modalités de fréquentation du système de transport Métrobus par les usagers,
- la nature et les caractéristiques des sols et massifs support des futures chaussées,
- les caractéristiques des solutions de traitement de sol et de couches de forme éventuelles qui seront mis en œuvre,
- les performances mécaniques réellement obtenues pour les matériaux bitumineux BBME et EME2, tels que mis en œuvre dans le contexte des travaux Métrobus.

Il convient de souligner que les dimensionnements proposés par le présent document s'appliquent aux parties de voies situées en site propre, à l'exclusion des parties partagées avec d'autres véhicules, ainsi que les carrefours avec la voirie urbaine existante. Ces parties de la voie devront obligatoirement faire l'objet d'études spécifiques de dimensionnement, prenant en compte l'accroissement des sollicitations supportées par les matériaux de chaussée dans ces parties de l'itinéraire.

Enfin, le choix entre les classes de performances mécaniques Q1 et Q2 (voir de performances intermédiaires) s'effectuera sur la base de l'évaluation exhaustive des

conditions locales propres au chantier du Métrobus. Ce choix devra obligatoirement intégrer le fait que les EME2 devront être formulés selon la méthode française de formulation des enrobés (version espagnole disponible au premier trimestre 2011) [10]. Ce sont des matériaux très exigeants au niveau des composants et des conditions de fabrication et de mise en œuvre, nécessitant des engins de chantiers et des ateliers de compactage irréprochables à haut niveau de technicité, et des équipes parfaitement formées.

RÉFÉRENCES

1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2010). "Censo Nacional de Población y Vivienda 2010".
2. Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal. (2010). "MetroBus. Movilidad de Vanguardia". pp 1-13.
3. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (1994), "Conception et dimensionnement des structures de chaussées: Guide technique". pp 260.
4. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (1992), "Le Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme: Guide technique". Vol. 1 et 2. pp 200.
5. AFNOR. Norme NF EN 12697 -1 a -43. "Mélanges bitumineux - Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud".
6. AFNOR. Norme NF EN 13108 -6 a -21. "Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux".
7. AFNOR. Norme NF 98-150-1 "Enrobés hydrocarbonés – Exécution des assises de chaussées, couche de liaison et couche de roulement".
8. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions. (2000). "Dimensionnement des structures des chaussées urbaines - Méthodologie de conception d'un catalogue adapté au contexte local". pp 58.
9. Guide technique SETRA – LCPC (novembre 1988) - Renforcement en enrobés à modules élevés en traversées d'agglomérations
10. Guide de formulation des enrobés – LCPC (mars 2011) - Manual de ayuda a la formulación de mezclas bituminosas
11. AFNOR. Norme NF EN 12697-22, "Mélange bitumineux - Détermination de la résistance aux déformations permanentes"